

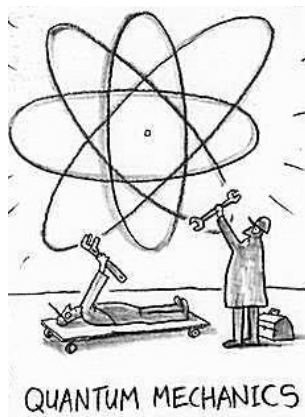
Kuo kvantinė susietis skiriasi nuo mums įprastų didelio pasaulio reiškinių?

Julius Ruseckas

Vilniaus universiteto Teorinės fizikos ir astronomijos institutas

Birželio 5, 2014

Kas yra kvantinė mechanika?



Kvantinė mechanika—tai teorija aprašanti mikroskopinių objektų judėjimą

Apie ką kalbėsime

Tema

Koreliacijos klasikinėje ir kvantinėje fizikoje

Kaip išmatuoti koreliaciją

- Turime daug sistemų
- Kiekvienai sistemai išmatuoti dydžius x ir y
- Perduoti juos į kompiuterį
- Taip padaryti daug kartų, kiekvienai sistemai
- Kompiuteryje suskaičiuoti sandaugos vidurkį

Dviejų dydžių x ir y koreliacija

$$\rho = \langle (x - \langle x \rangle)(y - \langle y \rangle) \rangle$$

Kaip koreliacija atsiranda

- Koreliacija tiek klasiknėje, tiek kvantinėje fizikoje atsiranda sąveikos metu
- Po sąveikos daleles galime atskirti ir nutolinti viena nuo kitos
- Jei atskyrimo ir nutolinimo metu dalelės nesutrikdomos, koreliacija išlieka. Tas galioja tiek klasikinėje, tiek kvantinėje fizikoje.

Dvi klasikinės dalelės



Eksperimentas I

- Turime daug pirštinių porų
- Kiekviena pirštinė apibūdinama vienu parametru: ji yra kairei arba dešinei rankai
- Koreliacija tarp pirštinių atsiranda gamybos metu
- Iš kiekvinos poros viena **atsitiktinai parinkta** (taip atsiranda tikimybės) pirštinė paliekama Žemėje, kita nusiunčiama į Kentaurą Alfa

Eksperimentas I

- Tiek Žemėje, tiek Kentauro Alfoje laborantas fiksuoja atsitiktinę kairiųjų ir dešiniųjų pirštinių seką:

Žemė KDKKDKDD...

Kentauro Alfa DKDDKDKK...

- Palyginus rezultatus matyti pilna koreliacija
- Jei muitinė Kentauro Alfoje konfiskuoja kai kurias pirštines (trikdis!), turime nepilną koreliaciją

Ekspertas I

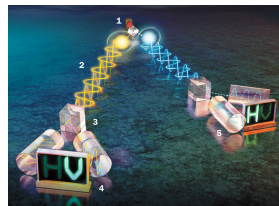
- Jei laborantas Žemėje pamato pirštinę kairei rankai. . .
- jis **iš karto** žino, kad Kentaurų Alfoje yra pirštinė dešinei rankai!

Žaibiškas informacijos perdavimas?

Ne! Kiekvienas iš laborantų mato tik atsitiktinę seką. Koreliacija išmatuojama tik persiuntus duomenis iš abiejų laborantų į Žemės kompiuterį.

Kvantinė mechanika?

Tol, kol apsiribojame tik **vieno** dydžio matavimu, koreliacija kvantinėje mechanikoje elgiasi **taip pat**, kaip ir klasikinėje



Dvi dalelės: pridedame dar vieną parametą



Eksperimentas II

- Kiekviena pirštinė, nepriklausomai nuo to, ar ji yra kairei ar dešinei rankai, gali būti raudona arba žalia. Vienoje poroje pirštinės yra skirtingų spalvų.
- Eksperimentas vykdomas tomis pačiomis sąlygomis

Eksperimentas II

- Jei žiūrima, ar pirštinei kairei ar dešinei rankai, gauname

Žemė KDKKDKDD...

Kentauro Alfa DKDDKDKK...

- Jei žiūrima į spalvą, gauname

Žemė RZZZRRZR...

Kentauro Alfa ZRRRZZRZ...

Ekspimentas II

- Kiekvienas iš laborantų gali atsitiktinai pasirinkti, ar žiūrėti kuriai rankai pirštinė, ar į jos spalvą:

Žemė KDZKRRZD...
Kentauro Alfa ZKRDZDRZ...

- Tiems matavimams kuriems atsitiktinai pasirinktas matuoti tas pats dydis vėl turime pilną koreliaciją

Piktas laboratorijos vedėjas

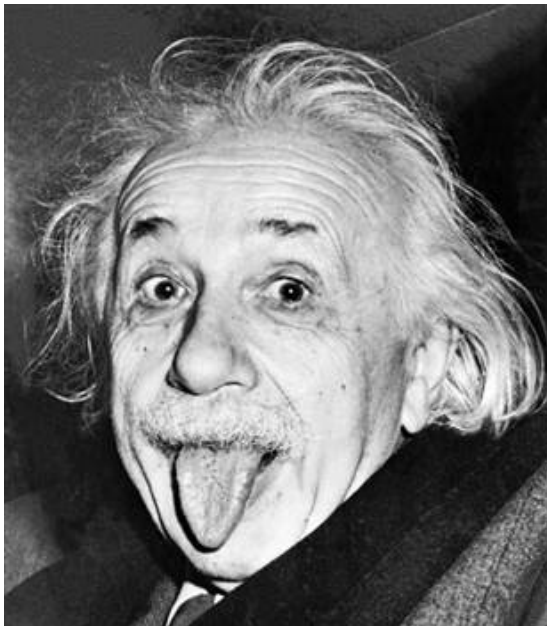
Draudžiama atlikti du matavimus su tuo pačiu objektu! Galima arba žiūrėti tik į formą arba tik registruoti spalvą.



Problema

Dabar neaišku, ar turime reikalą su spalvotomis pirštinėmis, ar, matuojant spalvą, pakišamas koks kitas daiktas.

Čia priėjo Einstein'as...



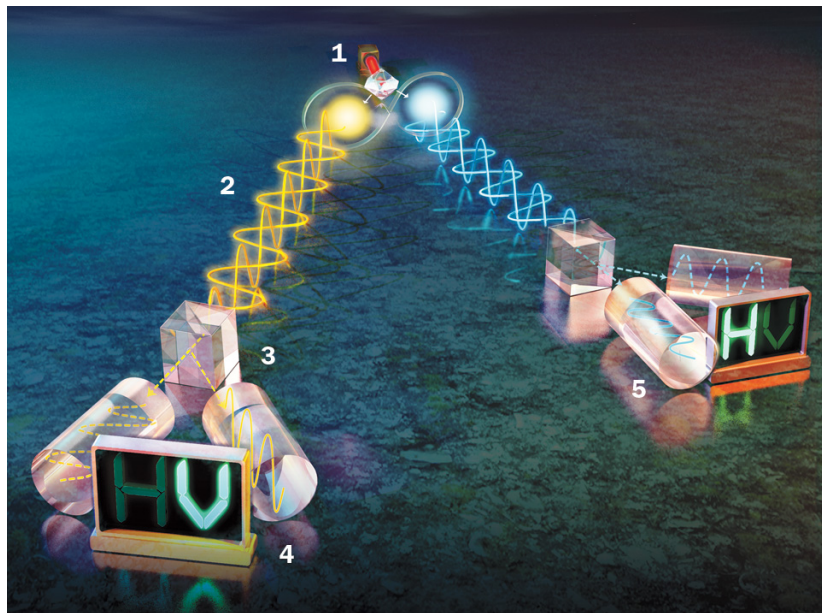
EPR pasiūlymas

- Reikia atlikti matavimus atskirtus erdviškuoju intervalu, atsitiktinai kiekviename gale pasirinkus $k\lambda$ (formą ar spalvą) matuoti.
- Jei gaunamos koreliacijos, vadinasi iš tikro matuojame spalvotas pirštines

EPR pasiūlymo logika

- Jei atsitiktiniai pasirinkimai ką matuoti yra atskirti erdviškuoju intervalu, tarp jų negali būti priežastinio ryšio.
- Todėl, jei matuojant formą yra pakišama pirštinė, o matuojant spalvą – koks nors kitas daiktas, negali būti žinoma, kokios formos pirštinė arba kokios spalvos daiktas turi būti pakišamas.
- Jei yra pakišama, tai koreliacijų neturi būti
- Jei yra koreliacijos, tai tikrai turime spalvotas pirštines!

Ekspimentas III, kvantinis: supinti fotonai



Ekspimentas III, kvantinis

- Turime daug susietų fotonų porų
- Vienas paliekamas Žemėje, kitas nesutrikdant nusiunčiamas į Kentaurą Alfa
- Matuojame vieną iš dviejų dydžių: poliarizacija išilgai vertikalios ir horizontalios ašių arba poliarizaciją išilgai ašių pasuktų 45 laipsnių kampu

Kvantmechaninis aprašymas

- Jei fotonų poliarizaciją matuojame ant tų pačių ašių, tai gauname, kad jų poliarizacijos yra priešingos: kai vieno fotono poliarizacija yra horizontali, kito yra vertikali. Registruojame pilną koreliaciją!
- Jei vieno fotono poliarizaciją matuojame vienoje ašių sistemoje, o kito fotono pasuktoje pirmosios atžvilgiu, tai matavimų rezultatai visiškai nekoreliuoti.

Kvantinė mechanika?

- Atrodo, viskas tas pats, kas ir su spalvotom pirštinėm.
- Sekant EPR logika, reikėtų fotonui priskirti apibrėžtą poliarizaciją tiek pradinių, tiek ir pasuktų ašių kryptimis.
- Jei apsiribojame tik **dviejų** dydžių matavimu, tokį priskyrimą galima daryti. Koreliacija kvantinėje mechanikoje elgiasi **taip pat**, kaip ir klasikinėje, jei laikysime, kad poliarizacijos vertės vertės yra apibrėžtos, bet nepasiekiamos vienu metu. Tai yra, turime **paslėptus kintamuosius** (hidden variables).

Pasak Einstein'o

Mes turime dvi alternatyvas:

- Fotonas turi abi poliarizacijos vertes, bet jos tiesiog nepasiekiamos vienu metu. Tai yra, turime paslėptus kintamuosius (hidden variables).
- **spukhafte Fernwirkung** (spooky action at a distance, vaiduokliškas veikimas per atstumą)

Kvantinė mechanika?

- Sekant EPR logika, reikėtų fotonui priskirti poliarizaciją tiek pradinių, tiek ir pasuktų ašių kryptimis. Bet...
- Kvantinė mechanika tą draudžia! Negalima vienai dalelei priskirti iš karto abiejų dydžių.

Paradoksas

Kvantinėje mechanikoje EPR pasiūlytas metodas **netinka!**

Dvi klasikinės dalelės, trys parametrai



Eksperimentas IV

- Turime daug pirštinių porų
- Kiekviena pirštinė gali būti raudona arba žalia, taip pat gali būti pažymėta apskritimu arba kvadratu. Vienoje poroje pirštinės yra skirtingų spalvų ir pažymėtos skirtingomis figūromis
- Koreliacija tarp pirštinių atsiranda gamybos metu
- Iš kiekvienos poros viena atsitiktinai parinkta pirštinė paliekama Žemėje, kita nusiunčiama į Kentaurų Alfą
- Laborantai Žemėje ir Kentaurų Alfoje matuoja vieną iš trijų parametrų (formą, spalvą arba ženklą). Iš matavimo rezultatų suskaičiuojamos koreliacijos

Ekspertas IV

Jei $N(\mathbb{K}, \mathbb{Z})$ yra žalių pirštinių kairei rankai skaičius, $N(\mathbb{K}, \bigcirc)$ yra pirštinių kairei rankai pažymėtų apskritimu skaičius, o $N(\mathbb{Z}, \square)$ yra žalių pirštinių pažymėtų kvadratu skaičius, tai nesunku pastebėti kad

$$N(\mathbb{Z}, \square) \geq |N(\mathbb{K}, \mathbb{Z}) - N(\mathbb{K}, \bigcirc)|$$

Ekspimentas IV

- Koreliaciją galime išreikšti per pirštinių, pasižyminčių savybėmis x ir y , skaičių:

$$C(x, y) = 1 - 2 \frac{N(x, y)}{N}$$

kur N yra pirštinių porų skaičius.

- Pasinaudoję anksčiau užrašyta nelygybe pirštinių skaičiams galime gauti nelygybę koreliacijoms.
- Jei dydžiai a , b ir c nurodo kuriai rankai piršinė, jos spalvą bei jos ženklą, tai

$$1 + C(b, c) \geq |C(a, b) - C(a, c)|$$

Bendresnė situacija

- Nagrinėjame tris dydžius a, b, c
- Kiekvienas iš jų gali įgyti tik dvi reikšmes
- Dalelės būseną nusako parametrų λ rinkinys
- **Lokalumas**. Dydžio x matavimo pirmai dalelei rezultatas priklauso tik nuo x ir λ : $F_1(x, \lambda)$. Jis negali priklausyti nuo to, kas daroma su antra dalele, nes pasirinkimai kokį dydį matuoti gali būti daromi atsitiktinai ir atskirti erdviškuoju intervalu.

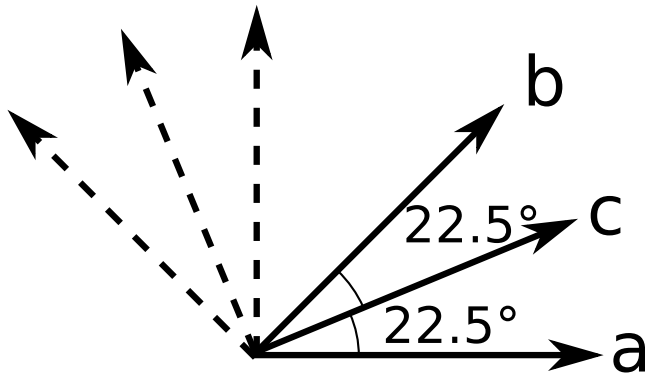
Bell'o nelygybė

$$|C(a, b) - C(a, c)| \leq 1 + C(b, c)$$

Eksperimentas V, kvantinis

- Turime daug susietų fotonų porų
- Vienas fotonas paliekamas Žemėje, kitas nesutrikdant nusiunčiamas į Kentaurų Alfa
- Matuojame poliarizaciją išilgai trijų ašiu a, b, c

Ekspimentas V



Kvantmechaninis aprašymas

- Iš kvantinės mechanikos gauname

$$C(a, b) = -\cos 2\widehat{ab}$$

Kvantmechaninis aprašymas

- Vadinasi, koreliacijos pagal kvantinę mechaniką yra tokios:

$$C(a, b) = 0, \quad C(a, c) = C(b, c) = -0.707$$

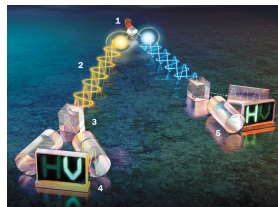
- Gauname:

$$1 + C(b, c) = 1 - 0.707 = 0.293 < |C(a, b) - C(a, c)| = 0.707$$

Kvantinė mechanika netenkina Bell'o nelygybės!

Kaip yra realybėje?

Eksperimentai rodo, kad gamtoje iš tiesų Bell'o nelygybės yra **pažeidžiamos**



Vadinasi, prielaidos, padarytos išvedant Bello nelygybę, kvantinėje srityje yra **neteisingos**:

- arba nėra lokalumo
- arba tokie parametrai λ (paslėpti kintamieji) yra negalimi

Kur Einstein'o klaida?

Mano nuomone, klaida EPR logikoje yra bandymas priskirti „būseną“ (kad ir kas tai bebūtų) atskirai dalelei.

Rezieme

Kvantinē mechanika leidžia **didesnes koreliācijas** nei mums
īprasta

Ačiū už dėmesį!